

doi:10.3788/gzxb20184703.0306004

色散补偿光纤上刻写的光纤光栅对纵向拉力和温度的同时测量

张旋¹, 张立松¹, 黄冬¹, 雍振¹, 谢倩¹, 高宏¹, 李东明¹, 乔学光²

(1 西安石油大学 理学院, 西安 710065)

(2 西北大学 物理系, 西安 710069)

摘 要:在色散补偿光纤上刻写光栅, 形成全光纤复合传感结构, 将干涉结构和光栅结构集成在同一段光纤内. 分析了干涉包层模式和布拉格谐振峰对纵向拉力以及温度的响应机理. 通过监测包层模式和布拉格谐振峰的波长漂移量, 建立矩阵方程, 实现对纵向拉力和温度双参量的同时测量. 实验结果表明, 包层模式和布拉格谐振峰对温度的响应灵敏度分别为 49.4 pm/°C 和 11.0 pm/°C, 包层模式对纵向拉力的响应灵敏度为 1.05 pm/μ ϵ , 布拉格谐振模式对纵向拉力的响应灵敏度为 0.651 pm/μ ϵ , 且这四个参数均表现出良好的线性度. 该传感器结构采用低阶包层模式和纤芯基模模式, 对外界环境折射率不敏感, 能较好地应用于纵向拉力和温度的同时测量中.

关键词: 光纤传感; 光纤布拉格光栅; 全光纤拉力传感器; 全光纤温度传感器; 双参量测量

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)03-0306004-6

Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Based on Grating Inscribed in Dispersion Compensation Fiber

ZHANG Xuan¹, ZHANG Li-song¹, HUANG Dong¹, YONG Zheng¹, XIE Qian¹,
GAO Hong¹, LI Dong-ming¹, QIAO Xue-guang²

(1 Key Laboratory on Photoelectric Oil-Gas Logging and Detecting, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(2 Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: A compound structure is fabricated by inscribing fiber Bragg gratings in dispersion compensation fiber, which is constituted by interferometer and fiber Bragg grating in a length of fiber. The strain and temperature response mechanisms of cladding mode and Bragg resonance are analyzed. The matrix equation is established through monitoring the cladding modes and Bragg resonance wavelength shift on the reflection spectrum, so that the simultaneous measurement of strain and temperature is achieved. The experimental results indicated that the temperature sensitivity of cladding mode and Bragg resonance are 49.4 pm/°C and 11.0 pm/°C, respectively. The strain sensitivity of cladding modes is 1.05 pm/μ ϵ and the strain sensitivity of Bragg resonance is 0.651 pm/μ ϵ . The four parameters show good linearity. Since the compound structure has low-order cladding modes and core modes, it is insensitive to the environment and can play an important role in the field of strain and temperature simultaneous measurement.

Key words: Fiber optics sensors; Fiber Bragg grating; All-fiber strain sensor; All-fiber temperature sensor; Double-parameter-measurement

OCIS Codes: 060.2300; 060.2310; 060.2370; 060.2430; 060.3735

0 引言

在实际工程应用中, 温度和纵向拉力形变是油气勘探开发、桥梁建筑工程^[1-2]等领域中需要在线监测的

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61327012, 61275088), 陕西省自然科学基金(Nos.2016JM6055, 2016JQ1027), 陕西省教育厅科研项目(Nos.2010JS037, 11JS050, 13JS088, 08JZ58)资助

第一作者: 张旋(1991-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为光纤光栅制备和油田应用. Email: zxuanmail@163.com

收稿日期: 2017-08-15; **录用日期:** 2017-12-04

<http://www.photon.ac.cn>

重要物理参量.与传统电类传感器相比,全光纤传感器因其体积小、耐腐蚀、质量轻、可分布式测量和灵敏度高等特点被广泛应用在工程领域.目前光纤拉力与温度同时测量的传感器主要包括传统光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)与马赫曾德干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)等纤芯失配的级联结构、长周期光纤光栅(Long-period Fiber Grating, LPG)与干涉结构的级联结构,以及特种光纤光栅如倾斜光栅(Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG)、包层光栅(Cladding Fiber Bragg Grating, CFBG)、受激布里渊散射等可分布式技术.Wen X^[3]等提出利用四芯光纤与单模光纤形成纤芯失配结构,再级联一个光纤光栅,这种光纤结构可以利用干涉的包层模式与光栅布拉格模式对温度和纵向拉力应变的不同响应灵敏度,实现对纵向拉力形变和环境温度变化的同时测量.GENG Tao^[4]等提出级联长周期光栅和锥形光纤这两种结构,实现了对纵向拉力形变和环境温度变化的同时测量,这种级联结构能较好地结合长周期光栅和锥形光纤对外界参量极其敏感的优点,适合高灵敏度的双参量测量.Zhang Wei-hua^[5]等提出利用倾斜光纤光栅的包层谐振模式和布拉格谐振峰对外界参量不同的响应特性,对纵向拉力形变和环境温度场变化进行了同时测量,实现了单个结构对双参量的同时区分测量.Xu Ning^[6]等提出一种基于布里渊散射原理的分布式温度应力测量方法.以上这些传感器都实现了光纤纵向拉力形变和温度的双参量测量,但往往需要多个光纤结构的级联才能实现,这导致了多种环境干扰因素(如折射率变化、模间耦合的干扰、熔接点形变的损耗等)被引入到系统中;或者需要十分精确的光纤加工,徒增传感器的制作难度;分布式技术成本较高、精度也较差.这些缺点都降低了这些类型传感器的稳定性和可靠性.因此,研制一种结构简单紧凑、成本低易于实现,同时又能实现纵向拉力和温度双参量测量的传感器具有重要意义.

本文在色散补偿光纤(Dispersion Compensation Fiber, DCF)上刻写光栅,形成纤芯失配干涉结构和光栅的全光纤复合传感结构,在同一段光纤上的两次简单加工,即可解决级联结构易受环境干扰的问题.该传感器利用干涉包层模式和布拉格谐振峰对纵向拉力以及温度的不同响应来实现纵向拉力和温度双参量的同时测量.

1 传感器结构与原理

实验激光器采用 193 nm ArF 紫外准分子激光器(ALEX),每脉冲能量 27 J,每秒钟 500 次脉冲照射,写栅曝光时间为 2 min 左右.刻栅所用相位掩模板的成栅长度为 15 mm.实验所用刻栅系统如图 1(a),刻栅光束经过透镜滤波整形为平行光束后,再经过柱面镜聚焦到相位掩模板的写栅区域,紧贴相位掩模板后方放置载氢单模光纤,载氢条件是 10 MPa、60℃ 环境下,放置 15 天^[7].光纤在写栅前需要一定预应力,使光纤保持平直状态,保证刻写栅区分布均匀.实验中选取 18 mm 长色散补偿光纤,在两端分别熔接单模光纤.单模光纤纤芯直径为 9.00 μm ,色散补偿光纤纤芯直径为 4.60 μm ,尾端的单模光纤保留大约 60 mm 长.在单模色散补偿光纤这种结构上写栅,主要是为了形成最小的干涉结构,而且较细的纤芯不易受外界环境的干扰(折射率、微弯损耗等).同时在色散补偿光纤上写出对比度较高的布拉格光栅,可以让干涉结构和光栅结构复合在同一段光纤内.相比级联的方式,结构更加简单、紧凑.

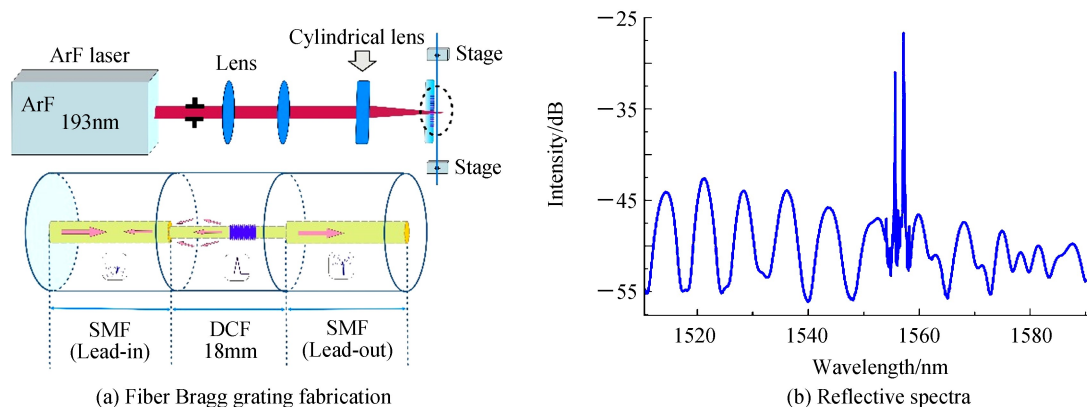


图 1 实验所用复合结构的制备示意图及反射光谱

Fig.1 Fabrication sketch and reflective spectra of compound structure in experiment

从图 1(b)可以看出,在传感器反射光谱中,只是在迈克尔逊(Michelson Interferometer, MI)干涉谱中出现了布拉格反射峰.由于反射谐振峰受到干涉光谱的调制,消光比较小,但是其所处的波长和 3dB 带宽保持不变,也不影响其测量灵敏度.

根据耦合模理论,布拉格光栅的中心波长 λ_B 、光纤纤芯的有效折射率 n_{eff} 和光栅有效周期 Λ_g 满足

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_g \quad (1)$$

对于迈克尔逊干涉结构,熔接点处发生纤芯失配时,一部分基模被激发到包层模式中.在下一个熔接点处,这些包层模式和纤芯的基模模式被反射回来,经过前一个熔接点时又被耦合入纤芯.这些包层模式和基模模式走过的距离都是 $2L$,但是由于所在传导模式的有效折射率不同,致使光程差不同,出现干涉.其反射光谱波谷波长表示为^[8]

$$\Delta n_{\text{eff}}\lambda_m = \frac{4\Delta n_{\text{eff}}L}{2N+1} \quad N=0,1,2,3,\dots \quad (2)$$

式中, Δn_{eff} 为干涉结构传导模式的有效折射率差. L 表示干涉臂长,即 DCF 的长度.

当该复合传感结构受到拉力作用时,由于弹光效应,光栅布拉格主峰的中心波长和干涉结构的波峰波谷会发生一定量的漂移.当所处温度场发生变化时,由于热光效应,光栅布拉格主峰的中心波长和干涉结构的波峰波谷也会发生相应的漂移.因此,二者对拉力和温度同时敏感.当这两者对环境温度和纵向拉力呈线性关系时,可以通过建立矩阵,实现该传感器对纵向拉力和温度的同时测量.

对于光栅布拉格主峰,由温度和拉力形变造成的波长漂移^[9]可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda_g} \frac{\partial \Lambda_g}{\partial T} \right) \Delta T + \left(\frac{1}{\Lambda_g} \frac{\partial \Lambda_g}{\partial \epsilon} + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon} \right) \Delta \epsilon = K_{B,T} \Delta T + K_{B,\epsilon} \Delta \epsilon \quad (3)$$

式中, $K_{B,T}$ 和 $K_{B,\epsilon}$ 分别表示布拉格主峰对温度的灵敏度系数和对纵向拉力的灵敏度系数.

对于 MI 干涉的波谷波长来说,由温度和拉力形变造成的波长漂移^[10]可以表示为

$$\begin{cases} \Delta\lambda_M = \frac{4(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n_{\text{eff},\Delta})(L + \Delta L)}{2N+1} - \frac{4\Delta n_{\text{eff}}L}{2N+1} = \frac{4\Delta n_{\text{eff},\Delta}(L + \Delta L) + 4\Delta n_{\text{eff}}\Delta L}{2N+1} \\ \frac{\Delta\lambda_M}{\lambda_M} \approx \frac{4}{2N+1} \left[\left(\frac{L\partial\Delta n_{\text{eff},\Delta}}{\partial T} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}\partial\Delta L}{\partial T} \right) \Delta T + \left(\frac{L\partial\Delta n_{\text{eff},\Delta}}{\partial \epsilon} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}\partial\Delta L}{\partial \epsilon} \right) \Delta \epsilon \right] = K_{M,T} \Delta T + K_{M,\epsilon} \Delta \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

式中, $K_{M,T}$ 和 $K_{M,\epsilon}$ 分别表示 MI 干涉的波谷波长对温度的灵敏度系数和对纵向拉力的灵敏度系数. $\Delta n_{\text{eff},\Delta}$ 表示干涉结构传导模式的有效折射率差在温度和拉力作用下的变化量.

因此,当布拉格主峰的漂移和 MI 波谷的漂移对纵向拉力和环境温度呈线性关系时,二者引起的布拉格主峰波长漂移量和 MI 波谷波长漂移量可以用双参量矩阵表示^[11-12],即

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{B,T} & K_{B,\epsilon} \\ K_{M,T} & K_{M,\epsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} \quad (5)$$

进而环境温度和纵向拉力的变化量可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} K_{M,\epsilon} & -K_{B,\epsilon} \\ -K_{M,T} & K_{B,T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_M \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $M = K_{B,T}K_{M,\epsilon} - K_{B,\epsilon}K_{M,T}$, 表示式(5)中系数矩阵对应的行列式值.最后将测得的灵敏度系数分别代入式(6)中,就可以求得环境温度和纵向拉力对应的变化量^[13-14].

2 实验结果与分析

传感器纵向拉力响应的实验测试如图 2.实验采用 MOI 公司的 SM125 型光纤光栅解调仪(Optic Sensing Interrogator, OSI)作为传感器反射信号解调设备,其光源波长范围为 1 510~1 610 nm,最小分辨率为 0.005 nm.拉力实验过程中,将复合结构置于图 2 所示的拉力装置上.位移平台 T_1 和 T_2 初始的距离为 100 mm 左右.平台 T_2 保持不动, T_1 每拉伸 0.01 mm,记录一次光谱数据.由微应力公式 $\mu\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 10^{-6}$ 可知^[15-16],记录的数据之间的间隔为 100 $\mu\epsilon$.在整个拉力测试过程中保持温度恒定为室温 25℃.实验测得的不同拉力下复合结构光谱如图 3.

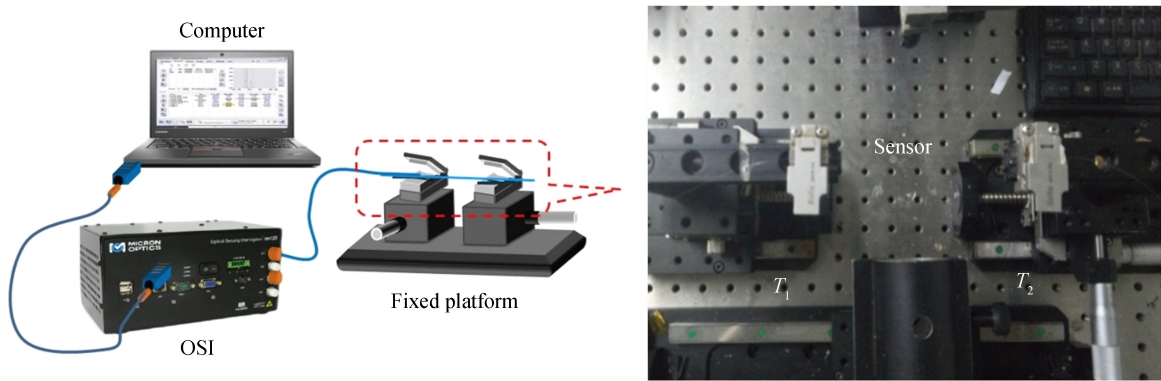


图 2 纵向拉力测试实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the strain-tested experimental setup

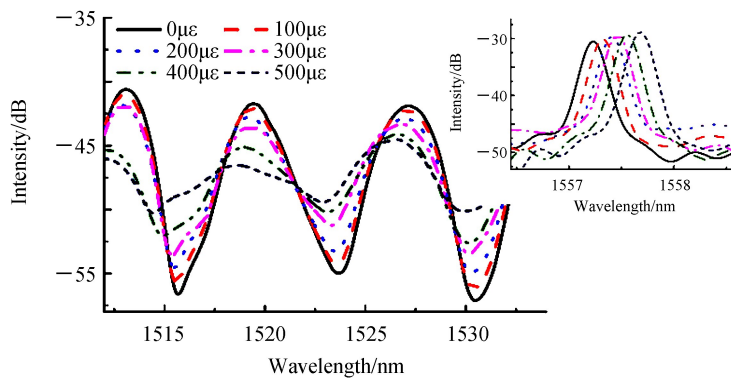


图 3 复合结构对纵向拉力的光谱响应

Fig.3 Spectral response of the compound structure for strain

由图 3 可见,随着传感器所受纵向拉力的增加,有效折射率 n_{eff} 变小,传导模式的有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff},\Delta}$ 也相应的变小, $\Delta\lambda_M$ 减小,MI 的反射光谱图样向短波方向移动,即发生蓝移.由于模式之间的耦合效率的降低,整个光谱的对比度也随之减小.然而布拉格主峰却发生红移,主要因为拉伸形变使得光栅有效周期增大,布拉格中心波长也随之增大,即反射光谱图样向长波方向移动,如图 3 中插图所示.为了进一步得到这种复合结构的纵向拉力响应特性,实验选取了 1524 nm 附近包层模式和 1557.23 nm 布拉格谐振模式,对该结构的波长漂移和纵向拉力之间的关系进行分析,绘制的拉力响应特性曲线如图 4.

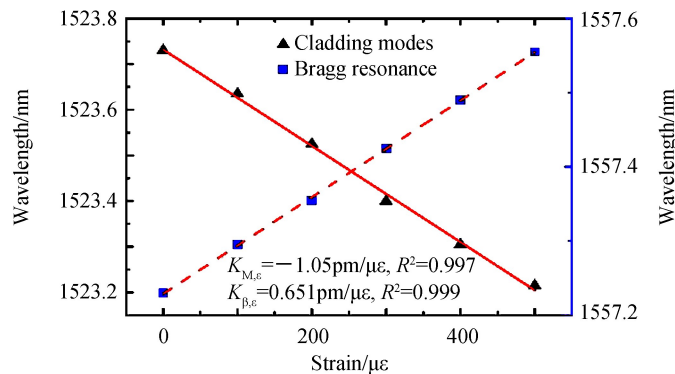


图 4 复合结构的布拉格谐振峰以及其包层模式的波长对纵向拉力的响应

Fig.4 Strain response of the compound structure for Bragg resonance wavelengths and cladding mode wavelengths

由图 4 可以看出,纤芯布拉格峰和包层模式对纵向拉力的响应灵敏度不同.布拉格峰因为光栅有效周期增大,中心波长增大,产生红移,其灵敏度较小,为 $0.651 \text{ pm}/\mu\epsilon$,线性度为 $R^2 = 0.997$.1524 nm 附近包层模式发生蓝移,其灵敏度 $-1.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$,线性度为 $R^2 = 0.999$.这两种模式在实验中都表现出了较好的线性关系,满足了式(5)矩阵成立的条件.所以式(6)中的矩阵系数 $K_{B,\epsilon} = 0.651 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $K_{M,\epsilon} = -1.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

在温度测量中,复合结构水平放置在恒温箱中,逐渐改变恒温箱箱内温度,记录数据,所得反射光谱图样

如图 5(a).随着环境温度的上升,复合结构的反射光谱向长波方向漂移.布拉格谐振峰的漂移量与包层模式的漂移量有较大差别,1 524 nm 处包层模式和布拉格谐振峰各自对应的波长漂移量和温度间的关系如图 5(b).布拉格谐振峰的灵敏度为 11.0pm/°C,线性度 R^2 为 0.999,1 524 nm 附近包层模式谷底的灵敏度为 49.4 pm/°C,线性度为 R^2 为 0.995.这两种模式在温度实验中都表现出了较好的线性关系,满足式(5)矩阵成立的条件,所以式(6)中的矩阵系数 $K_{B,T}=11.0\text{pm}/^\circ\text{C}$, $K_{M,T}=49.4\text{pm}/^\circ\text{C}$.

将所测得的复合结构两种模式对压力与温度的响应灵敏度系数代入式(6)中,式中 $M=K_{B,T}K_{M,\epsilon}-K_{B,\epsilon}K_{M,T}=-43.71$,则可得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{-43.71} \begin{bmatrix} -1.05 & -0.651 \\ -49.4 & 11.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_B \\ \Delta \lambda_M \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此,当该型复合结构所受到的纵向拉力和环境温度同时变化时,利用光纤解调仪对传感器的反射光谱漂移量进行实时监测,就可以同时得到压力与温度的具体改变量.

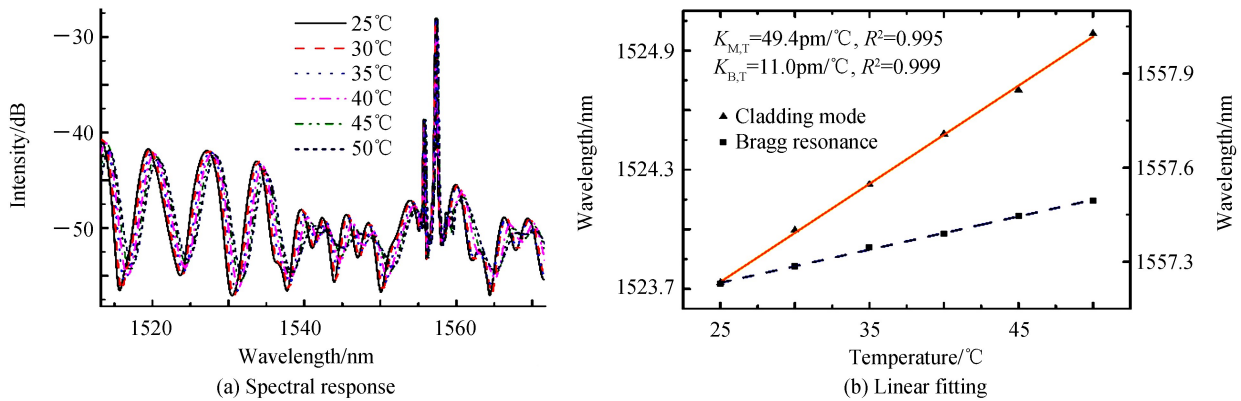


图 5 复合结构温度测试的光谱响应及其线性拟合

Fig.5 Spectral response and linear fitting of the compound structure temperature test

3 结论

提出并制作了一种基于在单模色散补偿光纤上刻写光栅,形成光栅与 MI 干涉的复合结构全光纤传感系统,实现了对纵向拉力和温度双参量的同时测量.分析了 MI 包层模式和布拉格谐振峰对拉力和温度的响应机理,并利用 1 524 nm 附近包层模式和 1 557.23 nm 布拉格谐振模式对双参量的不同响应进行了拉力和温度的区分测量.通过监测传感器反射谱的波长漂移量,对施加于传感器上的纵向拉力和环境温度进行了测量.有效解决了拉力应变测量过程中的温度交叉敏感问题.实验结果表明,1 524 nm 附近包层模式和布拉格谐振峰对温度响应灵敏度分别为 $K_{M,T}=49.4\text{pm}/^\circ\text{C}$, $K_{B,T}=11.0\text{pm}/^\circ\text{C}$;包层模式对拉力的响灵敏度为 $K_{M,\epsilon}=-1.05\text{pm}/\mu\epsilon$,布拉格谐振峰对拉力的响灵敏度为 $K_{B,\epsilon}=0.651\text{pm}/\mu\epsilon$.该复合型传感器兼容了干涉型传感器和光栅型传感器各自的优点,结构紧凑、不易受环境干扰、易于制作、可以实现双参量同时测量,可较好地应用于纵向拉力与温度的测量中.

参考文献

- [1] LIU Qin-peng, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, *et al.* Spectra power and bandwidth of fiber Bragg grating under influence of gradient strain[J]. *Photonic Sensors*, 2016, **6**(4):333-338.
- [2] REN Liang, JIA Zi-guang, LI Hong-nan, *et al.* Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, **20**(1):15-23.
- [3] WEN X, LIN H, ZHANG C, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index, strain, and temperature based on a four-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, **90**:179-184.
- [4] GENG Tao, LI Jian, YANG Wen-lei, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and strain using a long-period fiber grating with a micro-taper[J]. *Optical Review*, 2016, **23**(4):657-661.
- [5] ZHANG Wei-hua, YANG Bao-he, TONG Zheng-rong, *et al.* Temperature and strain sensing characteristics of the tilted fiber Bragg grating[J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, **6**(5):355-358.
- [6] XU Ning, DAI Ming. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, **8**(4):629-635.

- 徐宁,戴明.分布式光纤温度压力传感器设计[J].中国光学,2015,8(4):629-635.
- [7] YANG Ting-ting, QIAO Xue-guang, RONG Qiang-zhou, *et al.* Orientation-dependent displacement sensor using an inner cladding fiber Bragg grating[J]. *Sensors*, 2016, 16(9):1473.
- [8] LIU Hai, TAN Ce, MA Han-lin, *et al.* Temperature-insensitive strain measurement using in-fiber Bragg gratings inscribed in photonic crystal fiber[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(9):433.
- [9] WEI Ting, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, *et al.* Simultaneous sensing of displacement and temperature with a single FBG[J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(1):26-29.
- [10] LIN Chu-pao, WANG Ying, HUANG Yi-jian, *et al.* Liquid modified photonic crystal fiber for simultaneous temperature and strain measurement[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(4):129-133.
- [11] OLIVEIRA R, OSÓRIO J H, ARISTILDE S, *et al.* Simultaneous measurement of strain, temperature and refractive index based on multimode interference, fiber tapering and fiber Bragg gratings[J]. *Measurement Science & Technology*, 2016, 27(7):075107.
- [12] JIANG You-hua, FU Hai-wei, ZHANG Jing-le, *et al.* Simultaneous measurement of transverse pressure and temperature based on multi-core fiber cascaded with fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1):0106002.
蒋友华,傅海威,张静乐,等.基于多芯光纤级联布拉格光纤光栅的横向压力与温度同时测量[J].光子学报,2017,46(1):0106002.
- [13] TONG Zheng-rong, GUO Yang, YANG Xiu-feng, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and refractive index using a fiber Bragg grating and a multimode fiber[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 130(134):4053-4056.
- [14] LEE S M, SAINI S S, JEONG M Y. Simultaneous measurement of refractive index, temperature, and strain using etched-core fiber Bragg grating sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(19):1431-1433.
- [15] ZHANG Fa-xiang, LÜ Jing-sheng, JIANG Shao-dong, *et al.* High sensitive fiber Bragg grating micro-vibration sensor with shock resistance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8):0822002.
张发祥,吕京生,姜邵栋,等.高灵敏抗冲击光纤光栅微振动传感器[J].红外与激光工程,2016,45(8):0822002.
- [16] LIU Min, ZHAO Bing-yue, YANG Xu, *et al.* Seven-core photonic liquid crystal fibers for simultaneous mode shaping and temperature sensing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(6):060601.